Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Análisis Comparativo entre Modelos Matemáticos, software ETAP y Mediciones In Situ para la Caracterización de un Sistema Fotovoltaico Autónomo

Comparative Analysis between Mathematical Models, ETAP Software and In Situ Measurements for the Characterization of a Stand-Alone Photovoltaic System

Cisneros-Alemán, M.A.[a], Ontiveros-Mireles, J.J.[a]*, Castro-Palazuelos, D.E.[a], Galán-Hernández, N.D.[b], Rubio-Astorga, G.J.[a]

[a] Departamento Unidad de Posgrado. Tecnológico Nacional de México/ITCuliacán; C.P. 80220, Culiacán Rosales, Sin.
[b] Universidad Politécnica de Sinaloa UPSIN; C.P 82199, Mazatlán, Sin.
miguel.ca@culican.tecnm.mx, joel.om@culican.tecnm.mx*, david.cp@culiacan.tecnm.mx, ngalan@upsin.edu.mx, guillermo.ra@culican.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Modelado matemático de sistema fotovoltaico autónomo al tomar en cuenta las condiciones climáticas reales para su validación científica en el comportamiento dinámico de los elementos para desarrollar un software que ayude al óptimo dimensionamiento del sistema.

Área de aplicación: Sistemas fotovoltaicos autónomos.

Recibido: 01 agosto 2024
Aceptado: 03 junio 2025

Abstract

Determining the behavior of a Stand-Alone Photovoltaic System under real conditions is an important phase for its design, management, and energy efficiency. Photovoltaic modules are evaluated under standard irradiance and temperature conditions. However, in real conditions, location, orientation, tilt, and variations in irradiance and temperature all influence performance. This study characterizes a Stand-Alone Photovoltaic System installed in Mazatlán, Sinaloa, considering optimal site orientation and tilt. The mathematical models of the main system components (photovoltaic module, Buck-Boost converter, single-phase inverter, and battery) are validated**.** Validation is carried out through in situ experimental measurements and power flow simulation using ETAP software, evaluating the system's behavior under real environmental conditions. Statistical metrics such as Percentage Difference (DP), Root Mean Square Error (RMSE), and Normalized RMSE (nRMSE) are used to compare the results. The findings indicate

an accuracy of 98.07% compared to the experimental data and 96.85% compared to ETAP simulation, with an overall energy efficiency of 60%. These results support the feasibility of developing mathematical tools for the optimal and flexible design of Stand-Alone Photovoltaic Systems, applicable in analytical methodologies based on the direct electrical characteristics of components and their dynamic behavior under real conditions. It also facilitates a detailed analysis and accurate editing of system magnitudes, overcoming the limitations of existing design software. This methodology encourages the adoption of scientifically grounded approaches for establishing Stand-Alone Photovoltaic System as a reliable and sustainable source of renewable energy.

Keywords: Solar Energy, Experimental Approach, Modeling of Stand-alone Photovoltaic Systems.

Resumen

La determinación del comportamiento de un Sistema Fotovoltaico Autónomo en condiciones reales es una fase importante para el diseño, gestión y eficiencia energética. Los módulos fotovoltaicos se evalúan en condiciones estándares de irradiancia y temperatura. Sin embargo, en condiciones reales la ubicación, orientación, inclinación, variaciones de irradiación y temperatura influyen en el rendimiento. En este artículo, se caracteriza un Sistema Fotovoltaico Autónomo instalado en Mazatlán, Sinaloa, considerando orientación e inclinación óptima. Donde se validan los modelos matemáticos de los componentes principales que integra al sistema: módulo fotovoltaico, convertidor Buck-Boost, inversor monofásico y batería. La validación se realiza mediante mediciones experimentales in situ y simulación de flujo de potencia en el software ETAP, evaluando su comportamiento frente a condiciones ambientales reales. Para comparar los resultados se emplean métricas estadísticas como la diferencia porcentual (DP), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error cuadrático medio normalizado (nRMSE). Los resultados indican una precisión del 98.07% respecto a los datos experimentales y del 96.85% frente a la simulación en ETAP, con un rendimiento energético de 60%. Estos resultados respaldan la viabilidad del desarrollo de herramientas matemáticas para el diseño óptimo y flexible de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos, aplicables en metodologías analíticas con base en las características eléctricas directas de los componentes y su comportamiento dinámico bajo condiciones reales. Asimismo, se facilita el análisis y edición precisa de las magnitudes del sistema, superando las limitaciones de otras herramientas informáticas. Este enfoque impulsa la adopción de metodologías con fundamento científico para consolidar a los Sistema Fotovoltaico Autónomo como una fuente confiable y sostenible de energía renovable.

Palabras clave: Energía solar, Enfoque experimental, Modelado de sistemas fotovoltaicos autónomos.

1. Introducción

El aumento de población cada año es mayor, se prevé que para el año 2050 esta supere la cantidad de 10400 millones de personas [1], lo que lleva a intensificar los desafíos de demanda eléctrica, problemas ambientales como las emisiones de carbono y la necesidad de un desarrollo sostenible. La fuente de energía con alto potencial de generación es la

energía solar fotovoltaica, por su mayor disponibilidad [2].

La energía solar fotovoltaica se utiliza en diferentes aplicaciones como los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFVA) y los sistemas fotovoltaicos interconectados. Los SFVA se implementan para suministrar cargas eléctricas de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA), en ubicaciones de difícil acceso de electrificación como viviendas de zonas rurales, alumbrado público, sistemas de bombeo de agua y telecomunicaciones [3]. En cambio, los interconectados se implementan para cubrir los requisitos de energéticos y calidad de energía con reducción en los costos de electricidad y operación en viviendas e industrias respectivamente [4].

Por tanto, los elementos fundamentales de un sistema fotovoltaico se pueden simplificar en el módulo fotovoltaico y los circuitos electrónicos de potencia como convertidores CD-CD e inversores CD-CA. El módulo fotovoltaico, se fabrica al utilizar semiconductores que absorben la luz solar, para convertirla en electricidad de CD mediante el efecto fotoeléctrico [5]. Los circuitos electrónicos de potencia se emplean para modificar la potencia de salida, aumentar o disminuir el valor de voltaje de acuerdo con el cumplimiento del sistema y carga [6]. Por tanto, este trabajo se centra en las líneas de investigación de los SFVA y en el comportamiento de la transformación de energía solar a eléctrica, a través de los elementos del sistema en condiciones ambientales reales.

Los SFVA deben diseñarse de forma óptima para cubrir la demanda de carga con un nivel de disponibilidad definido en un balance entre la cantidad de recurso y el costo del sistema. El diseño depende principalmente de datos meteorológicos como la radiación solar y la temperatura ambiente, para estimar la producción de energía del arreglo fotovoltaico [7]. La estimación se realiza mediante las características eléctricas en condiciones de prueba estándar (STC 1000W/m^2 y temperatura de 25 °C) de los módulos fotovoltaico, donde las condiciones permiten determinar las características de corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V), las cuales facilitan extraer los parámetros desconocidos, como: el rendimiento de los materiales de construcción, la corriente generada por la luz, la corriente de saturación, el factor de idealidad, la resistencia en serie y la resistencia de derivación [8][9][10]. Sin embargo, en condiciones reales el rendimiento y la potencia de salida dependen de la ubicación, orientación, ángulo de inclinación, variaciones de irradiancia y temperatura, a razón, del cambio de posición del sol cada día y al movimiento aparente del sol a lo largo del año [11]. Por tanto, “la identificación del comportamiento, en condiciones ambientales dinámicas, es una fase importante para el diseño y la gestión de cualquier sistema de energía fotovoltaica” [12]. Además, los diseños deben realizarse a través de un análisis profundo el cual considere metodologías óptimas y el comportamiento de los elementos.

Las metodologías para un óptimo diseño son los métodos intuitivos, numéricos, analíticos, softwares comerciales e inteligencia artificial. Los métodos intuitivos mediante cálculos simples determinan la cantidad y tamaño de los componentes, con relación a las condiciones climáticas de radiación solar del "peor mes" para el SFVA. Por tanto, puede conducir a un sobredimensionamiento o subdimensionamiento que causará una baja confiabilidad para el sistema y aumentará los costos de capital, operativos y de mantenimiento del sistema [7] [13]. Los métodos numéricos probabilísticos consideran el efecto de la variabilidad de la radiación solar en el diseño del sistema. Por tanto, tiene una mayor precisión y

confiabilidad energética, lo cual implica cambios lineales de las variables de decisión para el dimensionamiento del SFVA.

Los métodos analíticos se caracterizan por el desarrollo de los modelos matemáticos de los componentes de un SFVA, en función de la fiabilidad para determinar la viabilidad y comportamiento del sistema [14]. En consecuencia, mediante cálculos simples con relación al área de captación disponible se estima el dimensionamiento, comportamiento y configuración optima con una alta precisión, pero tiene la desventaja de la dificultad para estimar los coeficientes de ecuaciones matemáticas dinámicas. Los diseños mediante los programas comerciales como HOMER, SolarPro, TRNSYS, PVsys, SAM-NREL, Helioscope, Aurora, etc. Se calculan en función de la información de la demanda de carga, base de datos metrológicos de radiación, especificaciones eléctricas y costos de los componentes, lo cual permite un dimensionamiento adecuado y estimación de generación de energía. Sin embargo, los usuarios de estos programas no tienen acceso a la configuración de los parámetros específicos de los componentes que integran al sistema [15] [16]. Los métodos por inteligencia artificial se utilizan para afrontar el problema de la disponibilidad de datos meteorológicos de radiación solar y estimar la producción de energía del arreglo con relación a la demanda de carga a cubrir [17]. Sin embargo, el diseño de los componentes del sistema es complejo.

En la actualidad los trabajos de investigación se enfocan en diseñar y desarrollar programas e interfases graficas de usuario (GUI por sus siglas en ingles *Graphical User Interface*) en función de alguna metodología planteadas anteriormente. En [18] se desarrolló un software con base en una interfaz GUI para calcular el dimensionamiento de la cantidad de módulos fotovoltaico y baterías del SFVA. Además, el software permite calcular el arreglo fotovoltaico y realizar un análisis económico del costo del sistema para un sistema interconectado. Esto mediante una metodología intuitiva con consideración en la información de la latitud del sitio y el perfil de carga. El programa, evalúa la fiabilidad del proyecto con el indicador de pérdida de probabilidad de carga, para una consideración técnica de referencia del porcentaje medio de la demanda no satisfecho por el diseño. En [19] se desarrolló una GUI para estimar el diseño de SFVA con consideración en la guía UTE C15-712-2. Esta guía se fundamenta mediante una metodología intuitiva y permite estimar el tamaño de los componentes que integran al sistema como; el controlador de carga solar, inversor, conductores y protecciones eléctricas. La GUI considera la información de las especificaciones eléctricas de los componentes. En [15] se elaboró una herramienta de software con base en MATLAB llamada PV.MY, la cual determina un diseño óptimo de sistemas fotovoltaicos. La herramienta a través de una metodología de inteligencia artificial determina las condiciones climáticas de radiación y temperatura para optimizar el ángulo de inclinación del módulo, tamaño del inversor y capacidades de batería. Además, la herramienta evalúa la fiabilidad del proyecto con la técnica de pérdida de probabilidad de carga.

Las investigaciones con relación al modelado matemático, simulación, validación e implementación de los componentes del SFVA, también están en progreso. En [5] se modeló y simuló de una celda fotovoltaica en el ambiente de programación MATLAB/Simulink para comparar las no-linealidades de las curvas I-V y P-V con las especificaciones del fabricante, a través del modelo de diodo simple (SDM por sus siglas en ingles *Simple Diode Model*) y modelo de diodo doble (DDM por sus siglas en ingles *Double Diode Model*) para diferentes radiaciones y temperaturas. En [20] se diseñó

un nuevo algoritmo de control del máximo punto de potencia (MPPT por sus siglas en ingles *Maximum Power Point Tracking*) con relación al modelado y simulación del convertidor Buck-Boost y un módulo fotovoltaico mediante la técnica de simulación *Bond graph* en SYMBOLS para su posterior implementación con patrones de irradiancia y sombras parciales. En [21] se analizó un sistema fotovoltaico autónomo en el ambiente de simulación MATLAB/Simulink conectado a un sistema de almacenamiento a través de un convertidor Boost CD-CD controlado por la técnica *Perturbation and observation* (P&O) más un inversor trifásico CD-CA.

En consecuencia, el análisis, identificación, modelado, simulación y validación de un SFVA en condiciones ambientales reales es necesario para determinar un diseño y comportamiento. Por tanto, el objetivo de este trabajo es analizar la caracterización de un SFVA en condiciones climáticas reales para impulsar el desarrollo de herramientas con fundamento matemático en el diseño de SFVA aplicables en una metodología analítica, con respaldo científico en la relación de las características eléctricas directas de los componentes y su comportamiento dinámico en condiciones ambientales reales ejecutable en diferentes ubicaciones. Esto contribuye no solo a maximizar el rendimiento energético, sino también a impulsar la adopción de metodologías óptimas para el diseño de SFVA y consolidar la energía solar fotovoltaica como una fuente clave de energía renovable. Esto mediante el fundamento de una validación del modelado matemático, técnicas experimentales de medición y simulación del sistema en software ETAP con consideración en condiciones ambientales reales.

En este articulo la descripción de la caracterización y modelos del recurso solar, celda fotovoltaica SDM, convertidor Buck-Boost, batería e inversor se describen en la sección 2. En la sección 3 se describen los resultados y la discusión. En la sección 4 se reportan las conclusiones. Finalmente, en el apéndice se muestra la nomenclatura de las ecuaciones.

2. Equipos y Materiales

La caracterización del SFVA considera la orientación sur e inclinación optima (23° para Mazatlán, Sinaloa). El SFVA está compuesto por el módulo fotovoltaico RNG-100D, un controlador de carga PWM (por sus siglas en ingles Pulse-Width Modulation) ($12V_{CD}$, $10A$), una batería fotovoltaica (OutBack EnergyCell) de ($12.84V_{CD}$, $100Ah@20$), un inversor monofásico de $300W$ (entrada de $12V_{CD}$ y salida a $120V_{CA}$, $60Hz$) y una carga de $20W$. El SFVA simulado en Matlab, a través de la comparación del modelo matemático de los elementos del sistema, técnicas experimentales de medición, Figura 1, Tabla 1 y simulación del sistema en software ETAP, se valida el comportamiento del sistema en condiciones ambientales reales mediante la estimación de la diferencia porcentual (DP), la raíz de error cuadrado medio (RMSE) y raíz de error cuadrado medio normalizado (nRMSE) [22]. Esto propicia el desarrollo de softwares de diseño de SFVA con fundamento matemático del comportamiento del SFVA en condiciones reales.

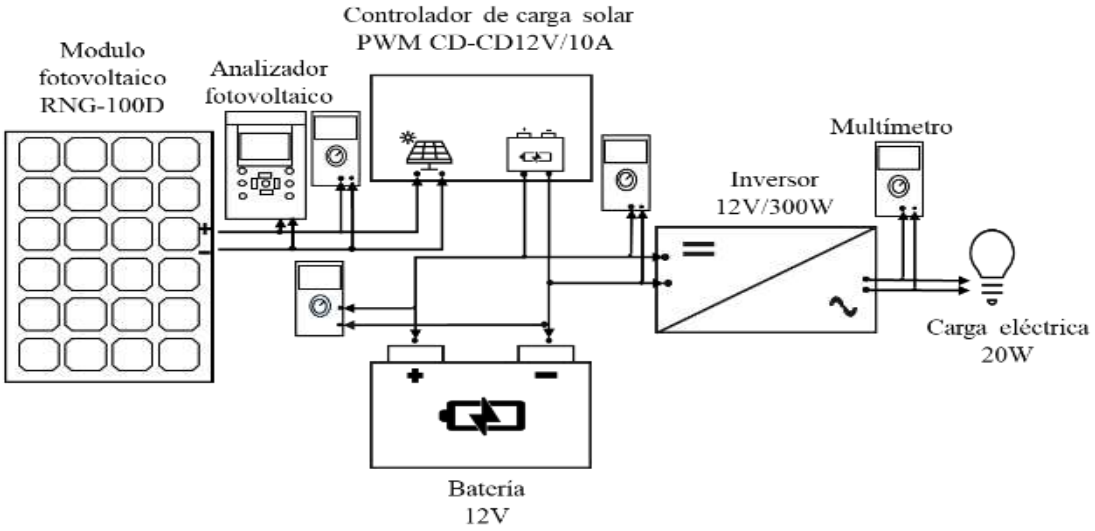


Figura 1. Esquema de conexión del sistema fotovoltaico autónomo y de los instrumentos de medición.

Tabla 1. Instrumentos de medición para condiciones ambientales reales.

Medición	Equipo	Precisión
Radiación	Piranómetro SL-200 KIMO	5% de la medición
Temperatura de la celda	Cámara termográfica FLUKE	± 2 °C o 2%
Especificaciones eléctricas (I-V y P-V)	Analizador fotovoltaico PROVA 210	±(1% de Voc ± 0.1V) ±1% ± 0.09A
Mediciones eléctricas	Multímetro	±(0.05 % + 1)

2.1 Modelo de energía solar

La determinación de la energía solar terrestre global ecuación (1), requiere determinar la dinámica de tiempo (τ_d) para un punto respecto al planeta tierra y realizar la corrección de tiempo del algoritmo de Yallop [23] [24] [25] [26] describen el procedimiento para determinar la energía solar terrestre global y sobre una superficie inclinada, ecuación (2). El procedimiento, consiste en calcular una serie de parámetros y correcciones respecto al punto en la tierra para un día de interés mediante la latitud, longitud, altitud y ángulo inclinación de la superficie.

$$G_{terre} = G_{dir} + G_{dif} \quad (1)$$

$$G_{tilted} = R_{dir} G_{dir} + R_{dif} G_{dif} + \rho R_{ref} G_{ref} \quad (2)$$

El modelo permite estimar la radiación solar para cualquier año, mes, día, hora y ángulos de interés como: inclinación óptima, acimut, declinación, altura solar, cenital, etc. Estos ángulos, permiten determinar la trayectoria del sol la cual es necesaria para un sistema de seguimiento solar de dos ejes, que los softwares integrados de sistemas fotovoltaico-autónomos tiene la posibilidad de integrar.

2.2 Modelo de diodo simple del módulo fotovoltaico

La estimación de las características eléctricas de un módulo fotovoltaico mediante el SDM, se determina al analizarse por las leyes de Kirchhoff en el circuito de la Figura 2, ecuación (3) [8], al desarrollar la ecuación (3) y determinar los coeficientes de temperatura de corriente y voltaje [27], se determinan las

características del módulo fotovoltaico por la ecuación (4). Donde, los parámetros de G y T_c son la irradiación solar y la temperatura de la celda en los puntos de estudio y los parámetros V voltaje en las terminales, IR_s corriente a través de la resistencia en serie y R_{SH} resistencia en paralelo, se determinan en la iteración dinámica de los niveles de voltaje en el cálculo de las curvas I-V y P-V. Asimismo, en la Tabla 5 se describen los parámetros y magnitudes del módulo fotovoltaico RNG-100D.

$$I = I_{ph} - I_D - I_{RSH} \quad (3)$$

$$I = \frac{G}{G_r}\left[I_{SC,REF} + K_I\left(T_c - T_r\right)\right] - I_{SC}\left(\frac{T_c}{T_r}\right)^{\frac{3}{A_0}} \cdot \frac{\left[\exp\left(\frac{q \cdot E_G}{k \cdot A_0} \cdot \frac{T_c - T_r}{T_c \cdot T_r}\right)\right]\left[\exp\left(\frac{q\left(V + IR_S\right)}{k \cdot A_0 \cdot T_c}\right)\right]}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{OC}}{N_s \cdot k \cdot A_0 \cdot T_c}\right) - 1} - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \quad (4)$$

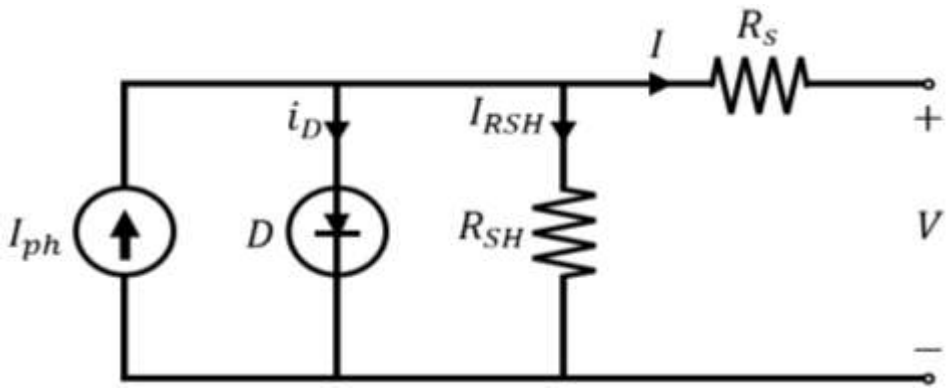


Figura 2. Diagrama de circuito del modelo de diodo simple (modulo fotovoltaico).

2.3 Modelo convertidor Buck-Boost

Los convertidores de potencia son una de las partes más importantes en el sistema fotovoltaico. Estos tienen la capacidad convertir los diferentes tipos de electricidad y hacer que la electricidad sea conveniente para el usuario final [28]. El convertidor Buck-Boost (Figura 3), a través del ciclo de trabajo del interruptor permite obtener en su salida un voltaje mayor o menor al de la fuente [29], al cargar y descargar la energía en los elementos pasivos (condensador e inductor). Donde el interruptor al funcionar como un conjunto binario (0,1) el circuito cambia y en consecuencia su modelo matemático. En la etapa binaria de conducción (1) se acumula la energía en el inductor $\dot{I}_L$ y transfiere la corriente a la carga de salida R. Enseguida, cuando está en la etapa binaria de desconexión (2) el inductor se conecta a la carga de salida y al condensador permitiendo la transferencia de energía desde el inductor $\dot{I}_L$ hacia el condensador V_C y la carga R. Por tanto, la técnica de promediado de estados permite describir el comportamiento de las etapas del convertidor, a través de la manipulación de un circuito equivalente, el cual analiza el circuito en la etapa cerrado (1) (Boost o elevador) y abierto (0) (Buck o reductor). Por consiguiente, al aplicar la técnica de espacio de estados promediados se permite obtener un modelo que convine, el comportamiento de un convertidor reductor y un convertidor elevador [30].

Al combinar el comportamiento del circuito equivalente y el ciclo de trabajo del PWM (D), el sistema es no-lineal. En consecuencia,

al encontrar el estado estable y los puntos de equilibrio mediante la derivación parcial de la ecuación dinámica de corriente y voltaje y sustituir a la entrada de control por U para un ciclo de trabajo variable, el sistema del circuito equivalente se linealiza, ecuación (5) . Donde, en la Tabla 6 se describen los parámetros y magnitudes, los cuales a través de la electrónica de potencia conforman el controlador de carga PWM ($12V_{CD}$, $10A$) que se utilizó.

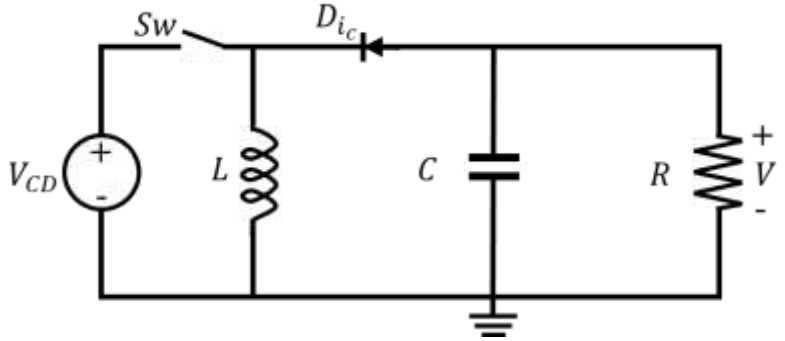


Figura 3. Convertidor Buck-Boost circuito.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L}D' \\ -\frac{1}{C}D' & -\frac{1}{C \cdot R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{DV_{CD}}{LD'} \\ \frac{DV_{CD}}{CRD'^2} \end{bmatrix} U \quad (5)$$

2.4 Modelo inversor monofásico de puente completo

Los inversores de CD-CA de puente completo, Figura 4, en los últimos años ha sido de gran interés en la energía solar fotovoltaica, a razón de producir una salida de CA sinusoidal cuya magnitud y frecuencia se pueden controlar [31]. El análisis de estos, es a través de una modificación en el ciclo de trabajo $D(t)$, por variación en términos de una forma de onda sinusoidal alrededor de un nivel promedio de 0.5, ecuación (6), donde (m) es una variación modulada del ciclo de trabajo con valor de $6kHz$ [32]. Por tanto, la comparación de la señal de referencia sinusoidal de un nivel promedio de 0.5, índice de modulación (m) y la señal portadora típicamente triangular permite el resultado de una componente sinusoidal en términos de anchos de pulso PWM para regular la secuencia de activación y desactivación de los interruptores. Donde al activarse los interruptores S_1 y S_3 los interruptores S_2 y S_4 se encuentren desactivados para evitar un conto circuito [32]. Al aplicar la técnica de espacio de estados promediados [30], se define el comportamiento equivalente del circuito por la ecuación (7), con el ciclo de trabajo $D(t)$ en entrada al sistema. Donde, en la Tabla 7 se describen los parámetros y magnitudes, los cuales a través de la electrónica de potencia conforman el inversor monofásico de $300W$ (entrada de $12V_{CD}$ y salida a $120V_{CA}$, $60Hz$) que se utilizó.

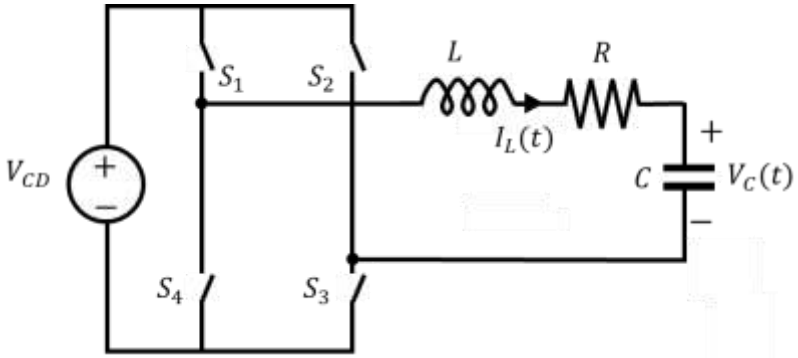


Figura 4. Inversor monofásico de puente completo con filtro RLC.

$$D(t) = 0.5 + m \cdot \mathrm{Sin}(wt) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{CD}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} (2D-1) \quad (7)$$

2.5 Modelo batería

Los SFVA emplean un sistema de acumulación energético (arreglo de baterías) para hacer frente a los períodos en los que la generación de los módulos fotovoltaicos es inferior al consumo [33]. Esto implica que las baterías permitan suministrar la energía eléctrica necesaria, para eventos donde la radiación solar por variaciones del clima ocasione que el módulo fotovoltaico no pueda cubrir los requerimientos energéticos. Por tanto, la batería permite asegurar el suministro eléctrico a los equipos conectados al sistema. Como resultado, es necesario el análisis del modelado matemático de la batería. Es posible encontrar diversos enfoques para el modelado de acumuladores de energía, algunos se orientan a la estimación de magnitudes y al comportamiento del electrolito, los cuales suelen ser no-lineales. En [34] se determina el espacio de estados lineal, ecuación (8), el cual tiene como entrada la corriente y salida el voltaje de circuito abierto, Figura 5. Donde $I_1(t)$ es la corriente de polarización, R_t la resistencia interna. R_P la resistencia en paralelo y C_P la capacitancia entre las placas de la batería. Dicho espacio de estados permite simular e integrar los demás modelos matemáticos. Donde, en la Tabla 8 se describen los parámetros y magnitudes batería fotovoltaica OutBack EnergyCell de ($12.84\mathrm{V}_{\mathrm{CD}}$, $100\mathrm{Ah@20}$) que se utilizó.

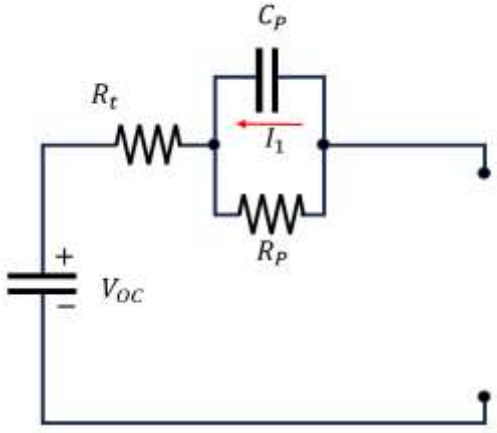


Figura 5. Circuito equivalente a la batería de Thévenin.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1(t) \\ \dot{V}_{OC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_P C_P} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t) \\ V_{OC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_P C_P} \\ 0 \end{bmatrix} I$$

$$Y = \begin{bmatrix} R_P & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t) \\ V_{OC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_t \end{bmatrix} I$$

(8)

3. Resultados y discusión

La caracterización del SFVA a través de mediciones realizadas para obtener las curvas I-V y P-V con el uso del analizador de curvas fotovoltaico, así como las mediciones de

voltaje y corriente en la entrada y salida del controlador de carga, voltaje a la entrada y salida del inversor monofásico, Figura 1, permiten determinar el comportamiento y rendimiento de la transformación de energía solar a energía eléctrica, a través de los elementos que componen el SFVA en condiciones reales. Asimismo, la integración de los modelos matemáticos de las tecnologías del sistema en conjunto con las condiciones ambientales caracterizadas, permiten simular el comportamiento del SFVA en dichas condiciones. Además, existen softwares con base en modelos para la simulación de diferentes sistemas de energía como Electrical Transient Analyzer Program (ETAP).

En ETAP es posible simular los sistemas de energía renovable como los SFVA, donde se pueden realizar diferentes estudios tales como: el flujo de potencia en CD/CA, análisis de corto circuito, protecciones, etc. ETAP tiene la capacidad de analizar los sistemas de energía fotovoltaica con diferentes pruebas de casos, por ejemplo, la consecuencia de una falla eléctrica, producción de energía para diferentes niveles de irradiancia, pérdidas de energía en conductores, estabilidad del sistema y tiempo transitorio de estabilización. Estas ventajas de análisis de ETAP permiten abstraer conclusiones de optimización respecto a la generación de energía de los sistemas y las cargas eléctricas, ubicación adecuada del sistema y determinación de filtros [35]. Por tanto, ETAP es una herramienta con significativa utilidad para el análisis de SFVA, con la cual se compara el modelo matemático para la validación. Por tanto, para validar el comportamiento de la integración de los modelos matemáticos utilizando Matlab, así como la caracterización obtenida a partir de las mediciones experiméntales y la simulación con el software ETAP, se propone llevar a cabo estudios estadísticos de DP, RMSE y nRMSE durante el día 23 de marzo en Mazatlán, Sinaloa.

La simulación en el software ETAP, Figura 6, se realiza al establecer las especificaciones eléctricas y técnicas de los componentes que integran al SFVA. Asimismo, se configura el control de carga y descarga BMS (por sus siglas en ingles *Battery Management System*) de la batería para suministrar o almacenar energía dependiendo de la irradiancia solar para las diferentes mediciones.

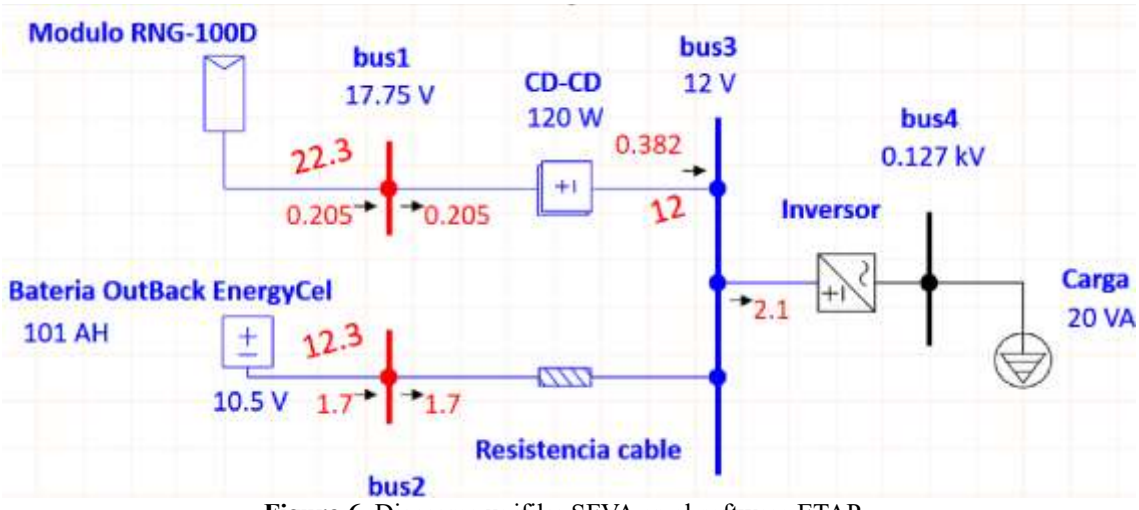


Figura 6. Diagrama unifilar SFVA en el software ETAP.

En la Figura 7, se muestra el comportamiento y comparación entre la radiación solar del algoritmo de Yallop, la radiación solar medida in situ y la simulada por el software ETAP, para una superficie inclinada a 23° del día 23 de marzo en Mazatlán, Sinaloa. Se delimitaron puntos específicos para observar y comparar las curvas I-V y P-V. La caracterización del recurso solar permite validar al algoritmo con una alta precisión al obtener un nRMSE de 17.09 y 25.59 respecto a las mediciones reales de radiación y la simulada por el software ETAP, Tabla 2. Asimismo, el algoritmo tiene una diferencia porcentual en la magnitud de 3.31 y 10.8 respecto a las mediciones reales y la simulada por el software ETAP. Por tanto, el algoritmo de Yallop tiene mayor exactitud y precisión con la radiación real medida de forma experimental.

Tabla 2. Resultados de métricas de comparación del modelo matemático de radiación solar con técnicas experimentales y software ETAP.

Métrica de comparación	Técnicas experimentales	Software ETAP
DP	3.31	10.8
RMSE	86.32	129.26
nRMSE	17.09	25.59

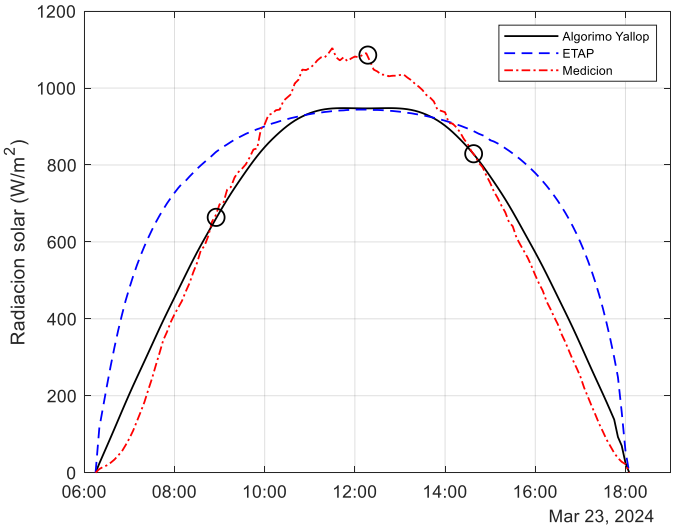


Figura 7. Radiación solar con una inclinación de 23° en Mazatlán, Sinaloa el 23 de marzo.

En la Figura 8, se muestra el comportamiento de las curvas de I-V y P-V mediante el SDM ecuación (4), técnicas experimentales y el software ETAP, en las respectivas observaciones de la Figura 7 donde influyen las variables de irradiancia y temperatura en el rendimiento de modulo. Se observa que las tres curvas siguen una tendencia similar. El modelo matemático muestra una aproximación a los datos medidos en campo, con un DP de 1.19% en el voltaje y 10.87% en la corriente respecto a los valores experimentales, según la Tabla 3. Además, la comparación con ETAP, el modelo matemático también presenta una proximidad de DP de 0.585% en el voltaje y 6.03% en la corriente respecto a las mediciones reales. Esto demuestra la validez del modelo como una herramienta útil para analizar sistemas fotovoltaicos en condiciones reales.

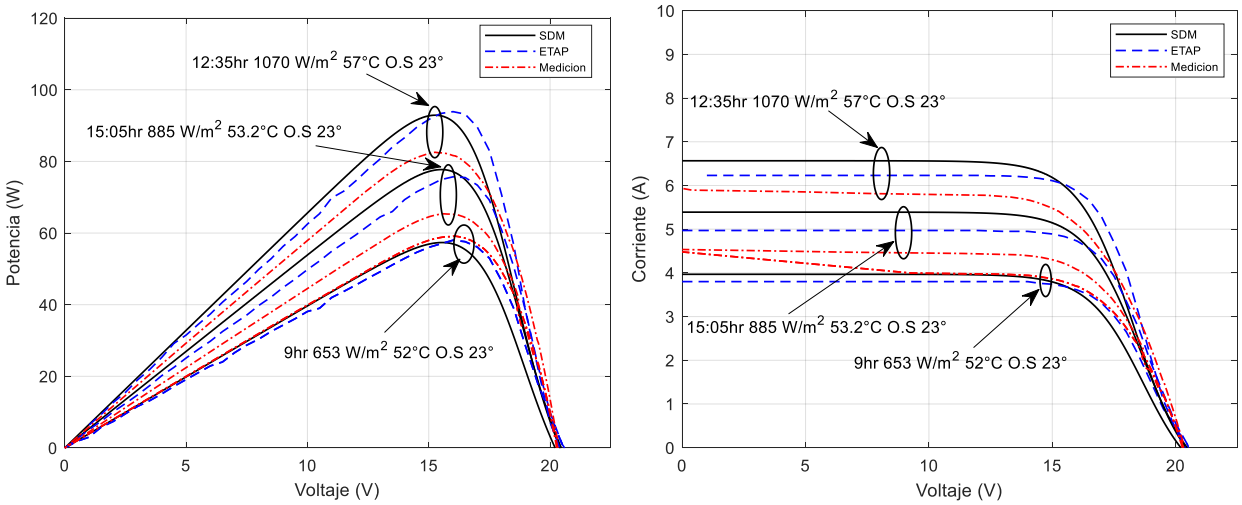


Figura 8. Comparación de SDM, ETAP y medición de SFVA en condiciones meteorológicas.

En las Figura 9-10 se muestra el comportamiento para las condiciones ambientales caracterizadas del día 23 de marzo en Mazatlán Sinaloa, de las salidas de voltaje y corriente del convertidor Buck-Boost (5), mediante las técnicas experimentales y con el software ETAP. Se observa que, ante un aumento de irradiancia, la corriente de salida del convertidor incrementa. El modelo predice con precisión esta respuesta dinámica en condiciones reales de irradiancia y temperatura. La desviación mínima entre el modelo y la medición experimental (nRMSE < 1%).

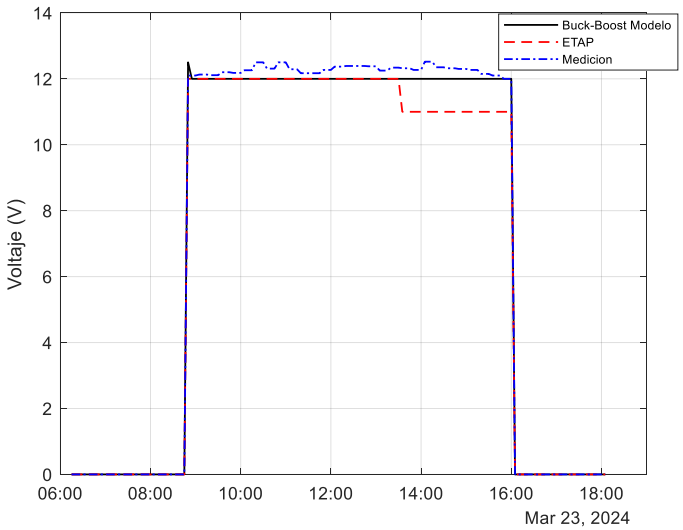


Figura 9. Comparación del rendimiento del modelo de convertidor Buck-Boost, ETAP y señal de voltaje de técnica experimental en condiciones climáticas.

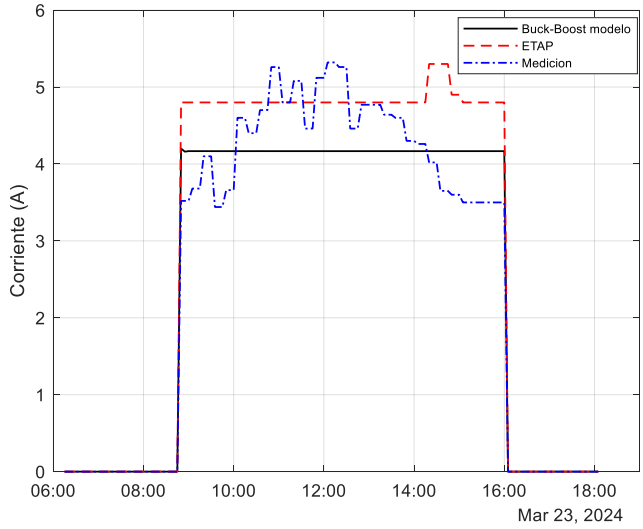


Figura 10. Comparación del rendimiento del modelo de convertidor Buck-Boost, ETAP y la señal de corriente de la técnica experimental en condiciones climáticas.

En la Figura 11, el comportamiento del voltaje de salida mediante el modelado la batería ecuación (8), técnicas experimentales y software ETAP, se observa que los tres enfoques siguen una misma tendencia, con pequeñas variaciones entre ellos. El modelo matemático reproduce de forma estable el valor de voltaje observado en las mediciones, con un error nRMSE menor al 1%, Tabla 3.

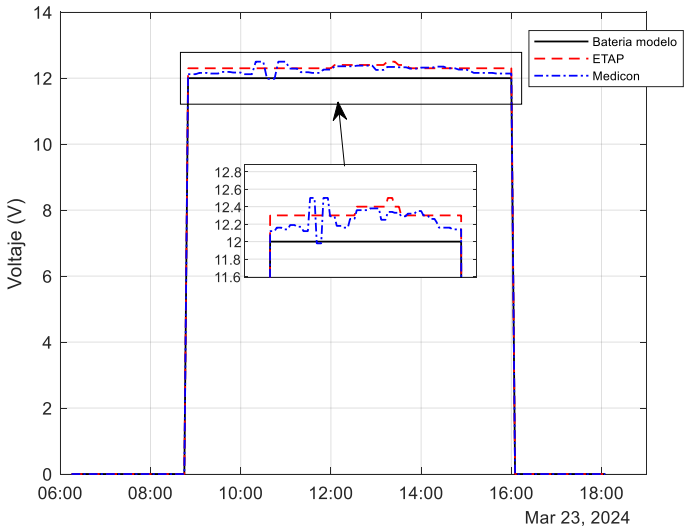


Figura 11. Comparación del rendimiento del modelo de batería, ETAP y técnica experimental en condiciones climáticas.

En la Figura 12, se muestra el comportamiento del voltaje de salida obtenido del modelo del inversor monofásico de puente completo, las técnicas experimentales y el software ETAP. Donde al modelo y software ETAP se le realizo el cálculo del voltaje RMS del valor efectivo de la señal en CA a razón de que el instrumento de medición cuantifica dicho valor. El modelo matemático logra reproducir con precisión el

voltaje de salida del inversor, con un error nRMSE inferior al 1.5% respecto a la medición experimental Tabla 3. Si bien ETAP también presenta una señal cercana al valor real, la diferencia del comportamiento de la magnitud dinámica puede atribuirse a las simplificaciones del modelo interno del software.

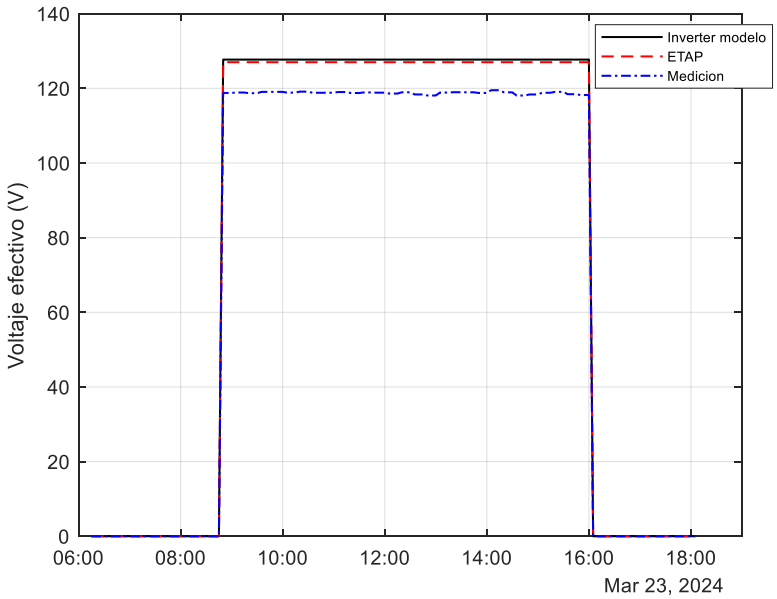


Figura 12. Comparación del rendimiento del modelo de inversor monofásico, ETAP y técnica experimental en condiciones meteorológicas.

En consiguiente la integración de los modelos que componen al sistema y las Figura 7-12, muestran el comportamiento del SFVA mediante técnicas experimentales y software ETAP para las condiciones ambientales caracterizadas del día 23 de marzo en Mazatlán, Sinaloa. Al realizar un análisis mediante herramientas estadísticas se obtiene un comportamiento similar entre el modelo, las mediciones y el software en los diferentes niveles de irradiancia solar. En las Tabla 3-4, se muestran los resultados estadísticos de la comparación de los modelos matemáticos respecto a los flujos de carga del software ETAP y las mediciones reales del SFVA. Por tanto, en la Tabla 3-4, se determina que las mediciones reales y de ETAP permite validar la simulación del modelo matemático al tener un DP bajo, lo cual se traduce a un porcentaje se similitud alto en magnitud. Además, la integración de los modelos tiene un alto grado de similitud en el comportamiento a través del tiempo con las mediciones reales y el software ETAP, al obtener RMSE y nRMSE bajos. Al analizar el comportamiento de la transformación de energía solar fotovoltaica a eléctrica a través de los componentes del SFVA Figura 8-11 mediante el cálculo de la potencia de entrada y salida de los componentes, se permite determinar la eficiencia global del SFVA, donde se obtuvo un rendimiento de la integración del modelo, caracterización experimental y simulación en el software ETAP de 60%, 62.74% y 61.8%, respectivamente en función de la energía útil entregada a la carga de 20W. Por tanto, también se permite validar el rendimiento en condiciones reales.

Tabla 3. Resultados de métricas de rendimiento de modelo matemático en mediciones reales.

Métrica de rendimiento	Módulo fotovoltaico		Convertidor Buck-Boost		Inversor monofásico de Puente completo	
	Voc	Isc	Vout	Aout	Vin	Vout
DP	1.192	10.873	2.453	13.597	2.236	6.931
RMSE	0.273	0.452	0.318	0.646	0.294	8.855
nRMSE	7.858	1.138	0.316	0.629	0.292	8.663

Tabla 4. Resultados de métricas de rendimiento de modelo matemático en Software ETAP.

Métrica de rendimiento	Modulo Fotovoltaico		Convertidor Buck-Boost		Inversor monofásico de Puente completo	
	Voc	Isc	Vout	Aout	Vin	Vout
DP	0.585	6.03	1.449	16.534	2.790	0.548
RMSE	0.169	0.466	0.417	0.702	0.339	0.700
nRMSE	8.050	0.783	0.417	0.689	0.334	0.685

En consecuencia, la integración de los modelos matemáticos puede aplicarse a softwares de diseño de SFVA, donde se considere la dinámica de transformación de la energía solar a eléctrica mediante los elementos del SFVA. En [36] realizaron un modelo de verificación de diseño, el cual considera condiciones climáticas para determinar si el dimensionamiento cumplen con los requisitos del usuario. El modelo de verificación simula los componentes del SFVA, mediante algoritmos de decisión con fundamento en las técnicas *C Bounded Model Checker* (CBMC), *Efficient SMT-based Bounded Model Checker* (ESBMC) y *Configurable Program Analysis Checker* (CPAchecker). Aunque, diseñaron una técnica confiable de validación y verificación técnica de dimensionamiento de SFVA, es necesario determinar modelos matemáticos confiables como los aquellos propuestos por [5] [20], los cuales permiten una simulación del comportamiento y rendimiento de la transformación de energía solar a eléctrica, en lugar de asumir los rendimientos propuestos por los fabricantes de los componentes como se realiza en [36]. Por tanto, una validación mediante técnicas experimentales y softwares con fundamento en modelos matemáticos permiten una mayor confiabilidad al momento de diseñar un SFVA. Además, es necesario validar en condiciones reales los modelos matemáticos lo cual en [21] no se realiza. Asimismo, en estudios recientes de [37] propusieron un marco probabilístico basado en regresión por procesos gaussianos para la predicción de salida fotovoltaica a corto plazo, logrando errores dentro del rango de −1.6% a +1.4% con un nivel de confianza del 95% y una reducción significativa del nRMSE (hasta 54.6%) al aplicar técnicas de selección de características y agrupamiento por k-means. Aunque su enfoque se centra en modelos estadísticos de predicción con base en variables meteorológicas, los resultados que se obtuvieron mediante el modelado matemático con base en ecuaciones diferenciales muestran una precisión comparable (nRMSE de 1.93% y 3.15%) validando su desempeño frente a datos reales y simulación en ETAP. Esto refuerza la viabilidad de emplear herramientas analíticas estructuradas como base para el desarrollo de sistemas de diseño solar personalizados, incluso sin depender de algoritmos de

aprendizaje automático o técnicas probabilísticas avanzadas.

4. Conclusión

La caracterización, identificación, análisis y evaluación de los SFVA en condiciones ambientales reales es una etapa de importancia para la implementación, desarrollo y optimización de la energía solar fotovoltaica. Por tanto, al validar la integración de los modelos matemáticos del SFVA con el uso del Matlab, a través de la caracterización y el software ETAP para las condiciones ambientales, se permite recrear el comportamiento real a partir del modelo matemático con un margen de precisión de 98.07% y 96.85% de la caracterización experimental y simulación en el software ETAP, respectivamente. En consecuencia, se determina que el modelado matemático es una fase preliminar a la implementación, a razón de permitir recrear el comportamiento del sistema en condiciones ambientales reales. Además, a través del modelado se determina y garantiza la eficiencia del sistema de 60% de la transformación de energía solar fotovoltaica a eléctrica a través de los componentes del sistema. Este trabajo sienta las bases para el desarrollo de herramientas comerciales y de código abierto, orientadas al dimensionamiento preciso de SFVA, lo cual podría ser adoptado por diseñadores e ingenieros del sector energético (agregar comparación con ETAP). Asimismo, los parámetros eléctricos de los componentes en dichas herramientas matemáticas se puedan configurar para diferentes capacidades. Este análisis promueve la viabilidad y adopción de SFVA como una fuente confiable y sostenible de energía.

5. Apéndice

Tabla 5. Especificaciones del módulo fotovoltaico RNG-100D.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje de circuito abierto	V_{OC}	22.5	V
Corriente de corto circuito	$I_{SC}, I_{SC,REF}$	5.75	A
Irradiación en STC	G_r	1000	W
Coeficiente de temperatura de corriente en corto circuito	K_I	0.0193	-
Temperatura STC	T_r	298	°K
Factor de idealización de la celda	A_0	1.1	-
Carga del electrón	q	1.60×10^{-19}	C
Constante de Boltzmann	k	1.38×10^{-23}	J/°K
Energía de la banda muerta	E_G	1.12	eV
Numero de celdas	N_s	36	-

Tabla 6. Especificaciones del convertidor Buck-Boost.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje de la fuente en corriente directa	V_{CD}	22.5	V
Inductancia	L	2.551×10^{-6}	H
Capacitancia	C	1.545×10^{-4}	F
Resistencia	R	4.2187	Ω
Ciclo de trabajo	D'	0.5	-

Tabla 7. Especificaciones del inversor monofásico de puente completo.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje de la fuente en corriente directa	V_{CD}	12	V
Inductancia	L	1.080×10^{-6}	H
Capacitancia	C	4.734×10^{-4}	F
Resistencia	R	0.48	Ω
Ciclo de trabajo	D'	0.5	-

Tabla 8. Especificaciones de la batería.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje de circuito abierto	V_{OC}	12.84	V
Resistencia interna	R_t	3×10^{-3}	Ω
Capacitancia entre las placas de la batería	C_P	14.3	F
Resistencia en paralelo	R_P	2.3889×10^{-3}	Ω

6. Referencias

[1] José Graziano da Silva, *The future of food and agriculture: Trends and challenges*, vol. 4, no. 4. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017. [Online]. Available: http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf%25

[2] A. Costa, T. S. Ng, and B. Su, "Long-term solar PV planning: An economic-driven robust optimization approach", *Appl. Energy*, vol. 335, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120702.

[3] L. Hernández-Callejo, S. Gallardo-Saavedra, and V. Alonso-Gómez, "A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance", in *2019 International Solar Energy Society*, Solar Energy, 2019, pp. 426–440. doi: 10.1016/j.solener.2019.06.017.

[4] S. C. Bhatia, *Advanced renewable energy systems*. 2014.

[5] C. Vimalarani and N. Kamaraj, "Modeling and performance analysis of the solar photovoltaic cell model using Embedded MATLAB", *Simul. Trans. ofthe Soc. Model. Simul. Int.*, vol. 91, no. 3, pp. 1–16, 2015, doi: 10.1177/0037549714568535.

[6] M. Y. Javed *et al.*, "A comprehensive review on a PV based system to harvest maximum power," *Electron.*, vol. 8, no. 12, 2019, doi: 10.3390/electronics8121480.

[7] T. Khatib, A. Mohamd,, and K. Sopian, "A review of photovoltaic systems size optimization techniques", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 454–465, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.02.023.

[8] N. Y. . Galán Hernández, Néstor Daniel; Ontiveros Mireles, Joel; Rubio Astorga, Guillermo Javier; Mejías Brizuela and J. Cañedo, "Caracterización experimental de un panel fotovoltaico bajo la radiación solar de mazatlán, sinaloa," in *Convención Cientifica Internacional 2017, Ciencia, Tecnología y Sociedad. Perspectia,s y Retos*, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2017, pp. 1–16.

[9] M. S. A. Kareem and M. Saravanan,

"A novel modeling approach to predict the output performance of photovoltaic modules under different environmental conditions", *Simul. Trans. ofthe Soc. Model. Simul. Int.*, vol. 94, no. 10, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1177/0037549718761208.

[10] A. C. de W. Atse Louwen, "Comprehensive characterisation and analysis of pv module performance under real operating conditions", *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, no. 25, pp. 218–232, 2017, doi: 10.1002/pip.

[11] S. Hamou, S. Zine, and R. Abdellah, "Efficiency of pv module under real working conditions", in *The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES14*, Energy Procedia, 2014, pp. 553–558. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.067.

[12] D. Ben hmamou *et al.*, "Experimental characterization of photovoltaic systems using sensors based on microbab card: Design, implementation, and modeling", *Renew. Energy*, vol. 223, p. 120049, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120049.

[13] M. Sidrach-de-Cardona and L. M. López, "A simple model for sizing stand alone photovoltaic systems", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 55, no. 3, pp. 199–214, 1998, doi: 10.1016/S0927-0248(98)00093-2.

[14] M. Egido and E. Lorenzo, "The sizing of stand alone PV-system: A review and a proposed new method", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 26, no. 1–2, pp. 51–69, 1992, doi: 10.1016/0927-0248(92)90125-9.

[15] T. Khatib, A. Mohamed, and K. Sopian, "A software tool for optimal sizing of PV systems in Malaysia", *Model. Simul. Eng.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/969248.

[16] T. Khatib, I. A. Ibrahim, and A. Mohamed, "A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system", *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 430–448, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.05.011.

[17] T. Khatib and D. H. Muhsen, "Optimal sizing of standalone photovoltaic system using improved performance model and optimization algorithm", *Sustain.*, vol. 12, no. 6, 2020, doi: 10.3390/su12062233.

[18] S. Ezzat Nousir, W. Refaat Anis, M. Abouelatta, G. Samir Adly, and M. A. Abdelaal, "Developing Techno-economic GUI-based Software for On-grid, and Off-grid Photovoltaic Systems Sizing", *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 3, p. 102508, 2024, doi: 10.1016/j.asej.2023.102508.[19]
N. Belhaouas, S. Khechafi, F. Mehareb, H. Aseem, S. Bensalem, and A. Hadj Arab, "Electrical standalone pv system sizing with graphic user interface (gui) based on ute c15-712-2 guide," in *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2019*, IEEE, 2019. doi: 10.1109/IRSEC48032.2019.9078201.

[20] A. E. Badoud, B. Raison, L. Lavado Fernando Vila, B. Ould Bouamama, and M. Khemliche, "Modeling, simulation and hardware implementation of a bond graph-maximum power point tracker for a photovoltaic panel under partially

shaded conditions", *Simul. Trans. ofthe Soc. Model. Simul. Int.*, vol. 92, no. 7, pp. 687–707, 2016, doi: 10.1177/0037549716646846.

[21] M. Kobbi, "Modeling, Simulation and Control of a Standalone Photovoltaic System", in *Advances in Green Energies and Materials Technology*, Springer, 2020, pp. 49–55. doi: 10.1007/978-981-16-0378-5_7.

[22] A. Abubakar Mas'ud, "Comparison of three machine learning models for the prediction of hourly pv output power in saudi arabia", *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 4, p. 101648, 2022, doi: 10.1016/j.asej.2021.11.017.

[23] D. W. Hughes, B. D. Yallop, and C. Y. Hohenkerk, "The Equation of Time", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 238, no. 4, pp. 1529–1535, 1989, doi: 10.1093/mnras/238.4.1529.

[24] J. Guillermo, "Modelado matemático de la trayectoria y recurso solar en tres ciudades del edo. de guerrero para implementación de sistemas fotovoltaicos", *Académica del Quehacer Univ.*, vol. 1, no. 2, pp. 77–84, 2018.

[25] Cooper. P.I, "The absorption of radiation in solar stills", *Sol. Energy*, vol. 12, no. 3, pp. 333–346, 1960, doi: 10.1016/0038-092X(69)90047-4.

[26] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation", *Sol. Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 1–19, 1960, doi: 10.1016/0038-092X(60)90062-1.

[27] F. M. D. De Yong, M. Maldonado,S.Lovera, "Analisis de sistemas fotovoltaicos operando bajo condiciones de sombra parcial", in *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Actas ASADES2016, 2016, pp. 71–81.

[28] M. Z. Zulkifli, M. Azri, A. Alias, N. Talib, and J. M. Lazi, "Simple control scheme buck-boost DC-DC converter for stand alone pv application system", *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 1090–1101, 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i2.pp1090-1101.

[29] F. S. Dinniyah, W. Wahab, and M. Alif, "Simulation of Buck-Boost Converter for Solar Panels using PID Controller", *Energy Procedia*, vol. 115, pp. 102–113, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.05.011.

[30] A. O. Simon Ang, *Power-switching converters*. Arkansas: Taylor & Francis Group, 2005.

[31] N. Mohan, *Power electronics*. New York: John Wiley & Sons, Inc. All, 1995.

[32] N. Chayawatto, K. Kirtikara, V. Monyakul, C. Jivacate, and D. Chenvidhya, "DC-AC switching converter modelings of a PV grid-connected system under islanding phenomena", *Renew. Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2536–2544, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.05.002.

[33] O. Perpiñán Lamigueiro, *Energía solar fotovoltaica*. España: Creative Commons, 2012.

[34] H. Wu, S. Yuan, and C. Yin, "A lithium-ion battery fractional order state space model and its time domain system identification", in *FISITA 2012 World Automotive Congress*, Springer, 2013, pp. 795–805. doi: 10.1007/978-3-642-33741-3_8.

[35] M. A. A. Darwish, "Design of a photovoltaic system using SAM and ETAP software", in *2021 International*

Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST), Malaysia: IEEE, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/GECOST52368.2021.9538717.

[36] A. Trindade and L. Cordeiro, "Automated formal verification of stand-alone solar photovoltaic systems", *2019 International Solar Energy Society*, vol. 193. Solar Energy, pp. 684–691, 2019. doi: 10.1016/j.solener.2019.09.093.

[37] F. Najibi, D. Apostolopoulou, and E. Alonso, "Enhanced performance Gaussian process regression for probabilistic short-term solar output forecast", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 130, no. July 2020, p. 106916, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106916.